

論文 エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎検討

木村 順哉^{*1}・上野 敦^{*2}・石田 征男^{*3}・宇治 公隆^{*4}

要旨：本研究は、普通エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの適用性に関する検討として、特に凍結融解抵抗性に着目したものである。空気連行特性として、気泡間隔係数と細孔構造の観点から凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。また、エコセメントを用いることで粗大化する可能性のある細孔構造を緻密化するため、フライアッシュの混和を行い、エコセメントフライアッシュ併用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性についても検討を行った。この結果、エコセメントを単独で用いた場合であっても、高濃度の塩化物イオン環境下でない場合、十分な凍結融解抵抗性を有することが明らかとなった。

キーワード：エコセメント, RCCP, 気泡間隔係数, 細孔径分布, 凍結融解抵抗性, フライアッシュ

1. はじめに

持続可能な社会の形成のためには、マテリアル循環型の材料の積極的な使用が望まれており、その一例として都市ごみ焼却灰を主原料とした普通エコセメント(以下、エコセメント)が挙げられる。エコセメントは、現在主としてプレキャストコンクリートなどに使用されているが、さらなる利用促進のためには、アルカリ量や塩化物イオン量などの面¹⁾を考慮して、セメント量およびセメントペースト体積が少ないコンクリートへの適用が有効と考えられる。このことを考慮すると、密なセメントペーストを少量含む構成とできる舗装用超硬練りコンクリートが、エコセメントの適用先として有効であると考えられる。

筆者らは、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの基礎特性として、締固め性、強度、静弾性係数および乾燥収縮ひずみについて検討し²⁾、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートは、舗装用途に十分適用可能であることを示してきた。また、連行空気を導入した場合についても、前述の基礎特性に関して検討を行い、十分な性能を有することを示している³⁾。

エコセメントを用いたコンクリートの組織構造は、普

通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)を用いた場合と比較して、粗大な細孔を多く含む⁴⁾。疎な組織構造は、凍結融解抵抗性の面でも悪影響を及ぼす。このため、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートについても凍結融解抵抗性を基礎的に検討する必要がある。

本研究は、空気連行を行ったエコセメント舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関して、気泡間隔係数および細孔構造の観点から検討したものである。また、エコセメントを用いた場合、凍結融解抵抗性の低下が懸念されるため、この対策として、フライアッシュを混和した場合についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

結合材は、密度 3.16g/cm^3 の普通ポルトランドセメント、密度 3.14g/cm^3 の普通エコセメントおよび密度 2.29g/cm^3 のフライアッシュ II 種を使用した。骨材は、表-1 に示すとおりの物性を持つものを使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの示方配合は、表-2 に示すとおりである。粗骨材の粒子間空隙体積に対するモルタル体積の割

表-1 骨材の物性

種類		産地	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	F.M.
細骨材	S	掛川産山砂	2.59	1.84	1.72	67.7	2.62
砕石5号	G _大	桜川産砕石	2.65	0.51	-	-	7.04
砕石6号	G _小	桜川産砕石	2.65	0.47	-	-	6.08
砕石2005 ^{*)}	G	-	2.65	0.50	1.61	61.0	6.68

^{*)} 砕石2005は、砕石5号：砕石6号＝63:37(質量比)で混合使用

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所セメント・コンクリート研究部舗装技術情報チーム 工修 (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

配合記号	W/B	Km ^{*)}	Kp ^{*)}	FA置換率 (%)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	B		S	G	AE減水剤 (B×%)	AE助剤 (B×%)
							C	FA				
N	0.35	1.50	1.92	0	2.5	110	314	0	658	1356	0.125	0.015
E	0.35	1.50	1.93	0	2.5	110	314	0	656	1356	0.125	0.025
EFA	0.35	1.50	2.02	15	2.5	110	267	47	642	1356	0.125	0.045

表-3 実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合

配合記号	W/B	Km ^{*)}	Kp ^{*)}	FA置換率 (%)	実測空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	B		S	G	AE減水剤 (B×%)	AE助剤 (B×%)
							C	FA				
N	0.35	1.49	1.92	0	2.4	110	314	0	659	1358	0.125	0.015
E	0.35	1.50	1.96	0	2.7	110	313	0	655	1353	0.125	0.025
EFA	0.35	1.50	2.06	15	2.9	110	266	47	640	1350	0.125	0.045

*) Kmは粗骨材空隙体積に対するモルタルの割合, Kpは細骨材空隙体積に対するペーストの割合を示す

合(Km)を1.50,単位水量を110kg/m³,水結合材比(W/B)を0.35とした。混和剤にはリグニンスルホン酸化合物を主成分としたAE減水剤と、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤のAE助剤を使用し、目標空気量2.5%となるようAE助剤の使用量を調整した。超硬練りコンクリートの場合、連行空気量2%以上であれば十分な締固めを行うことにより、安全側に見て耐久性指数60%を確保可能であることが既往の研究により明らかとなっているため⁵⁾、目標空気量を2.5%とした。この条件の下、結合材を普通セメントとしたもの(N),エコセメントとしたもの(E),エコセメントの一部をフライアッシュで置換したもの(EFA)を作製した。フライアッシュの置換率は質量置換で15%とした。本研究では連行空気をセメントペーストの一部と仮定しているため、連行空気の導入によって細骨材量が少なくなり、細骨材の粒子間空隙体積に対するペーストの割合(Kp)が大きくなることとなる。

表-3に実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合を示す。表-2に示した配合と比較すると、目標空気量に対する実測空気量の増加(減少)に伴って、材料全体の単位量は減少(増加)する。本研究では連行空気をセメントペーストの一部としているため、実測空気量が大きな配合では、Kpが大きくなっている。

2.3 供試体の作製方法

(1) 円柱供試体の作製方法

円柱供試体の寸法はφ100×200mmとし、供試体は充填率100%となるように計量した試料を用いて作製した。試料の型枠への投入は、振動台(50Hz)上で振動を加えながら、材料分離が生じないように注意しながら行った。試料を投入後、上部に錘(4kg)をのせ、充填率100%を目標として振動締固めを行った。最後に、振動台から型枠を取り外し、振動機(140~180Hz)をコンクリート表

面に押し当て、表面を仕上げた。

(2) 角柱供試体の作製方法

角柱供試体の寸法は100×100×400mmとし、供試体は充填率が100%となるように計量した試料を用いて作製した。試料は、ハンドスコップで3層に分けて投入し、突き棒を用いて突固めを行った。試料の計量および投入は、材料分離が生じないように注意しながら行った。その後、振動タンパ(50Hz)をコンクリート表面に押し当てて、所定の体積になるまで締固めを行った。締固め終了後は、コテを用いて上面を仕上げた。

2.4 試験項目

(1) 締固め性

超硬練りコンクリートの締固め性は、JSCE-F 508(超硬練りコンクリートの締固め性試験方法)によって試験し、充填率が98%となるのに必要なエネルギー(E98)および達成可能充填率(Cf)によって評価した。

(2) フレッシュコンクリートの空気量

フレッシュコンクリートの空気量の測定は、(財)全国土木コンクリートブロック協会が規定するCBA-2「超硬練りコンクリートの空気量試験方法」に準拠して行った。

(3) 機械的性質

圧縮強度および静弾性係数は、JIS A 1108およびJISA 1149に従って、φ100×200mmの円柱供試体を用いて試験した。曲げ強度は、JIS A 1106に従って、100×100×400mmの角柱供試体を用いて試験した。供試体は全て材齢28日まで20℃の水中で養生を行った後に試験に供した。

(4) 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数

材齢28日まで20℃の水中で養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体の中心部から、厚さ約10mmの試験片を採取し、前処理として150, 240および800μmの研

磨粉で表面研磨した。その後、ASTM C 457 リニアトラバース法に従って、硬化コンクリートの空気量、気泡の比表面積および気泡間隔係数の算出を行った。

(5) 細孔径分布

硬化コンクリートの空気量測定用試料を切り出した供試体の残部から厚さ約 5mm の平板を 2 枚切り出し、平板中心部付近のモルタルを切断採取した。採取したモルタル片は、アセトンに 24 時間浸漬して水和を停止後、7 日間真空乾燥を行い、細孔径分布の測定に供した。測定は水銀圧入式ポロシメータを用いて行った。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148 の水中凍結融解法(A 法)に準拠して行い、本研究では材齢 28 日まで 20℃の水中で養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体を用いた。また、本研究では試験溶液に水道水を用いた場合に加え、寒冷地における凍結防止剤散布を想定して NaCl3%溶液を用いた場合についても試験を行った。なお、既往の研究より、NaCl3%溶液を用いた試験において、フライアッシュの混和により良好なスケール抵抗性を示すことが明らかとなっているため⁶⁾、EFA に関しては凍結融解抵抗性にとって不利な条件である NaCl3%溶液を用いた試験のみ実施した。

3. 結果および考察

3.1 締固め性

表－4 に、各コンクリートの締固め性試験の結果を示す。E98 は、充填率 98%を達成するのに必要なエネルギーを示し、この値が小さいほど締固めが行いやすいことを示す指標である。N と比較して、E の E98 は若干小さく、既往の報告^{3),4)}どおりの結果となっている。また、EFA では、最も締固め性が良好という結果となった。このことは、フライアッシュの形状や粒度の影響、また、配合上、Kp が大きいことによる影響と考えられる。

Cf は、達成可能充填率を示しており、非常に高い締固めエネルギーを与えたときの推定充填率を示す指標である。今回の配合は全て充填率 98%以上の締固めができる結果となっており、E98 の小さな締固めしやすい配合ほど、高い充填率が得られた。加賀谷らは、連行空気量を 2%以上かつ締固め率を（充填率と同義）97%以上確保することで、凍結融解抵抗性において耐久性指数 60 以上を確保可能であると報告している⁵⁾。従って、充填率の面からは、本研究での超硬練りコンクリートは、いずれも良好な耐凍害性を有するものと予想できる。

3.2 空気量および連行空気特性

表－5 に、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの空気量、気泡間隔係数および気泡の比表面積の測定結果を示す。

表－4 締固め性試験の結果

	E98(J/L)	Cf(%)
N	84.7	98.3
E	54.7	98.9
EFA	39.5	99.2

表－5 コンクリートの空気量の測定結果一覧

	空気量(%)		気泡間隔係数 (μm)	比表面積 (mm ² /mm ³)
	フレッシュ	硬化		
N	2.4	3.6	181	27.40
E	2.7	2.6	219	26.32
EFA	2.9	3	343	15.94

(1) 硬化前後の空気量

フレッシュコンクリートの空気量と硬化コンクリートの空気量の関係を比較すると、N では、硬化コンクリートの空気量が過大に評価される結果となった。フレッシュコンクリートの空気量測定においては、大きな空隙は水で満たされるため、測定されないが、硬化コンクリートの空気量測定においては、締固め不足による残存空隙も測定してしまう可能性があることが指摘されている⁵⁾。N は、E および EFA よりも E98 が大きく、最も締固めしにくいコンクリートとなっていた。これらのことを考慮すると、本研究での硬化コンクリートの空気量は、締固め不足による残存空隙を含んだ結果となっていると考えられる。一方、エコセメントを用いた E および EFA の空気量は、測定方法の相違に関わらず同等の結果となっている。

(2) 気泡間隔係数と空気泡の比表面積

加賀谷らによると、超硬練りコンクリートで十分な耐凍害性が得られる気泡間隔係数は、一般のコンクリートでの 200~250 μm 以下よりも大きく、300 μm 以下となる⁵⁾。E の気泡間隔係数は、N と比較して若干大きいものの、300 μm より十分に小さい値となっている。EFA の気泡間隔係数は N および E よりも大きく、空気泡の比表面積は顕著に小さい結果となった。良質の AE 剤を用いたコンクリートでは、空気泡の比表面積は 16.0~24.0mm²/mm³の範囲にあるのに対し、エントラップドエアのみでは 12.0mm²/mm³以下になるとされている⁷⁾。EFA は、N および E よりも、空気量は大きいものの、気泡の比表面積が小さいことを考慮すると、EFA では大きな気泡が形成されているものと考えられる。

(3) 空気泡の分布性状

図－1 に、硬化コンクリートの空気量測定結果として、気泡径ごとの空気量を示す。なお、ここではリニアトラバース法で測定された弦長を気泡径として扱っている。一般に凍結融解抵抗性の向上に寄与する連行空気泡の寸

法範囲は $50\sim 500\mu\text{m}$ といわれているが⁷⁾、E は N よりもこの範囲の連行空気量が少なく、特に、気泡径 0.1mm 程度においてこの現象が顕著となっている。本研究では、連行空気量をセメントペースト体積の一部としているため、表-3 に示した実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合では、目標空気量に対する実測空気量の増大によって、セメントペーストの体積が増大し、単位細骨材量が減少している。気泡径 0.1mm 程度の連行空気量は、細骨材量の減少に伴い減少するとも考えられるため、空気量が多く、細骨材量が少ない E は、この範囲の空気量が N と比較して少なくなったものと考えられる。

また、気泡径が 0.1mm 程度の空気量が少なくなった理由として、使用したエコセメントの比表面積が、普通セメントより大きく、AE 助剤をより多く吸着していることも一因であると考えられる。さらに、フライアッシュを使用した EFA においてこの範囲の空気量が少ないことは、フライアッシュに含まれる未燃カーボンなどに AE 助剤が吸着したためと考えられる。

3.3 機械的性質

表-6 に各コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度の測定結果を示す。E の圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度は、N と同等であった。

EFA の機械的性質は、E と比較して、いずれも小さな値となっている。このことは、材齢 28 日までの水中養生では、フライアッシュのポズラン反応が十分に進行しておらず、組織が十分に形成されていないためと考えられる。しかし、最も低強度となった EFA であっても、圧縮強度は 50N/mm^2 以上であり、高い強度水準での比較となっている。また、全ての配合において、転圧コンクリート舗装用途の超硬練りコンクリートの設計基準曲げ強度 (4.5N/mm^2) を十分に満足した。

従って、エコセメントを用いた場合およびエコセメントの一部をフライアッシュに置換した場合であっても、舗装用超硬練りコンクリートとして十分な強度および弾性係数を有していると言える。

3.4 細孔径分布

図-2 に各コンクリートの細孔径分布の測定結果を示す。一般に、エコセメントを用いた場合の細孔径分布では、普通セメントを用いた場合より細孔径が大きくなり、総細孔量も増加する²⁾。しかし、本研究の結果では、E の細孔径分布は、N とほぼ同等であり、総細孔量も同程度となっている。また、その総細孔量は 0.07ml/g を下回り、非常に少ない。すなわち、水セメント比が 0.35 と低い舗装用超硬練りコンクリートの場合、エコセメントを用いても、普通セメントを用いた場合と同等の組織構造を持ったコンクリートとなるとわかる。

EFA の細孔径分布は、E と比較して、特に $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$

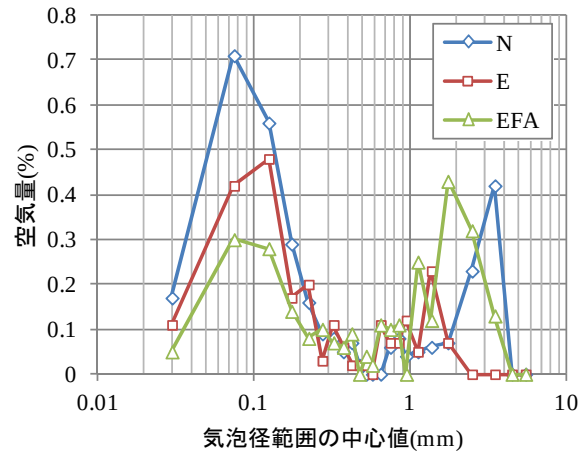


図-1 気泡径ごとの空気量

表-6 機械的性質の測定結果一覧

	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
N	61.7	35.3	7.4
E	59.0	36.7	7.2
EFA	54.7	34.5	6.0

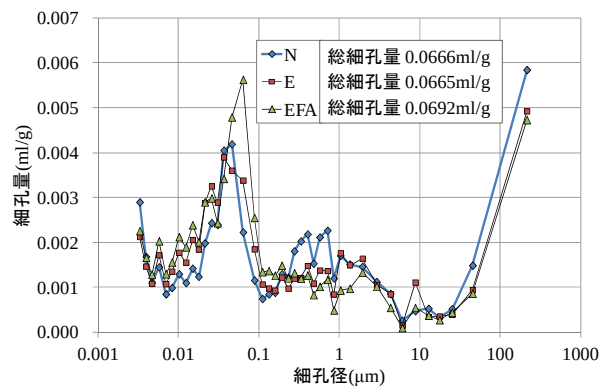


図-2 細孔径分布

m 付近の細孔量が多く、総細孔量も多くなっている。この結果は、3.3 の機械的性質の結果と同様に、材齢 28 日までの水中養生ではフライアッシュのポズラン反応が十分に進行していないことに起因すると考える。胡桃澤らは、フライアッシュを混入することで、材齢 1 年においてエコセメント単体では埋めることのできない細孔（細孔径 $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔）を減少することができると報告しており⁸⁾、このことを考慮すると、超硬練りコンクリートにエコセメントとフライアッシュを用いた場合であっても、長期材齢とすることで、より緻密な組織構造を持ったコンクリートとなると推察される。

3.5 凍結融解抵抗性

図-3 に凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化を、図-4 に凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化を示す。両グラフともに、塗りつぶしのプロットは真水における凍結融解試験の結果を示し、白抜きのプロッ

トは NaCl3%溶液における凍結融解試験の結果を示している。ここで、NaCl3%溶液を用いた水中凍結融解試験法は、通常の真水中での凍結融解試験法よりも極めて厳しい試験条件であることに留意が必要である。

(1) 相対動弾性係数

図－3 から、真水での試験において、エコセメントを用いた E-H₂O の相対動弾性係数の変化は、普通セメントを用いた N-H₂O と同様に推移していることがわかる。また、セメント種類に関わらず、真水での試験と NaCl3%溶液での試験の結果にほぼ全サイクルに渡って大きな差異はみられない。従って、試験水の相違が相対動弾性係数の低下に及ぼす影響は小さいと言える。

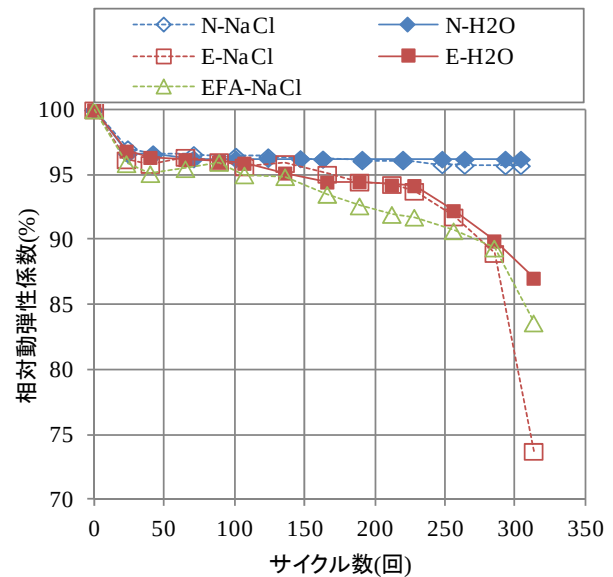
また、エコセメントの一部をフライアッシュで置換した EFA-NaCl の相対動弾性係数は、E-NaCl と比較してほぼ同様の推移となっている。また、300 サイクル時点での耐久性指数が最も低い E-NaCl であっても、その値は 81%程度である。従って、本研究の全配合において、相対動弾性係数の面では十分な凍結融解抵抗性を有したコンクリートとなっていると考えられる。

(2) 質量減少率

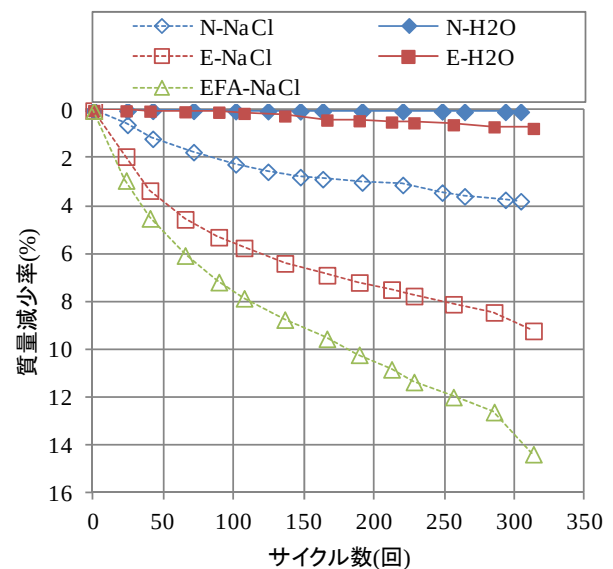
図－4 から、真水での試験において、エコセメントを用いた E-H₂O の質量減少率は、相対動弾性係数の推移と同様に、普通セメントを用いた N-H₂O と同等の傾向を示している。また、N-H₂O と E-H₂O の質量減少率は 1%以下となっており、極めて小さい。このことから、通常環境下での凍結融解においては、エコセメントを用いた場合であっても、普通セメントを用いた場合と同等の十分なスケーリング抵抗性を有していると言える。

NaCl3%溶液での質量減少率は、EFA-NaCl、E-NaCl、N-NaCl の順に小さくなっており、N および E に関しては真水を用いた場合と比較して増大している。また、EFA-NaCl は最も質量減少率が大きくなったが、このことは 3.3 の機械的性質および 3.4 の細孔径分布の結果と同様に、材齢 28 日までの水中養生では、フライアッシュのポズラン反応が十分に進行していないことに起因するものと考えられる。従って、フライアッシュの効果を適切に判断するためには、長期の養生を行った場合についての検討が必要であると考えられる。

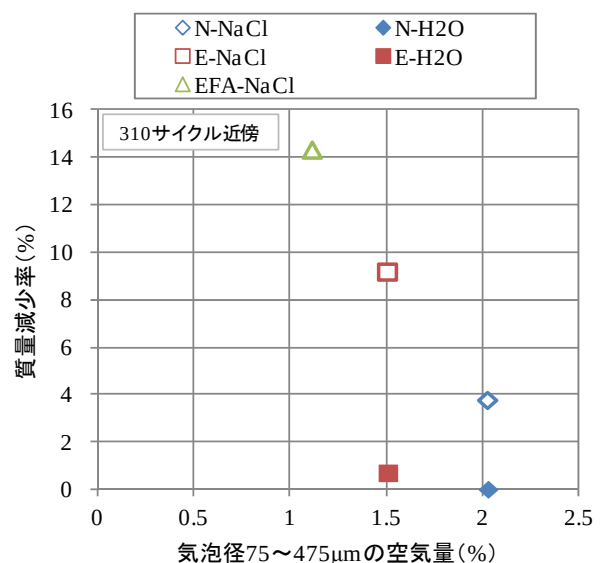
凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが凍結融解抵抗性、特にスケーリングに及ぼす影響に関しては、諸説あるものの、そのメカニズムは未だ明らかとなっておらず、現在も研究が行われている⁹⁾。図－2 に示した細孔径分布の結果から、N と E の細孔構造はほぼ同等であり、EFA のそれは若干疎であるものの、全ての配合で総細孔量は 0.07ml/g 以下と顕著に少ない。また、遠藤らは、組織の緻密化はスケーリングの抑制に寄与すると報告しているが、過剰な緻密化（総細孔量 0.10ml/g 以下）は粗大なモ



図－3 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化



図－4 凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化



図－5 特定の気泡径範囲の連行空気量と質量減少率

ルタル塊の剥離を発生させる場合があると指摘している¹⁰⁾。このことを考慮すると、本研究における結合材種類による質量減少率の相違に対して、細孔構造による影響は、それほど大きくないと考えられる。

図-5に、凍結融解抵抗性に寄与する寸法範囲の50～500 μm に相当する気泡径75～475 μm の連行空気量と310サイクル近傍の質量減少率の関係を示す。3.2(3)でも述べたとおり、この範囲の空気量は、EFA、E、Nの順に大きくなっている。図-5からは、NaCl3%溶液を用いた場合、この範囲の空気量の増加に伴って、同一サイクル時点での質量減少率が顕著に減少することがわかる。また、試験溶液が真水の場合は、NaCl3%溶液を用いた場合ほど顕著な関係を示さないことがわかる。従って、水セメント比が0.35と低い舗装用超硬練りコンクリートの場合では、連行空気の性状がスケーリングに大きな影響を及ぼすものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関して基礎的な検討を行ったものである。本研究の範囲で、次のことが明らかになった。

- (1) エコセメントおよびフライアッシュを混和したエコセメントを用いた超硬練りコンクリートの締固め性は、普通セメントを用いた場合と同等以上となる。
- (2) エコセメントを用いた場合の直径50 μm ～500 μm の連行空気泡は、普通セメントを用いた場合よりも少なく、フライアッシュを混和した場合にはさらに少なくなる。
- (3) 空気連行を行い、エコセメントの一部をフライアッシュに置換した場合であっても、舗装用超硬練りコンクリートとして十分な機械的性質を有したコンクリートとなる。
- (4) エコセメントを用いた場合であっても、低い水セメント比(0.35)の超硬練りコンクリートであれば、その細孔構造は普通セメントを用いた場合と同等となり、顕著に緻密な組織構造となる。
- (5) 高濃度の塩化物イオン環境下でない場合、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性は、普通セメントを用いた場合と比較して、ほぼ同等となり、十分な凍結融解抵抗性を有する。
- (6) 凍結融解試験にNaCl3%溶液を用いた場合、相対動弾性係数の低下に及ぼす影響は小さいが、質量減少に及ぼす影響は比較的大きい。
- (7) フライアッシュを用いた場合、材齢28日までの水中養生では凍結融解抵抗性の改善効果が表れなかった。

改善効果を適切に判断するためには、長期の養生を行った場合についての検討が必要である。

- (8) NaCl3%溶液を用いた場合、気泡径75～475 μm の連行空気量の増加に伴って、同一サイクル時点での質量減少率が顕著に減少する。また、試験溶液が真水の場合は、NaCl3%溶液を用いた場合ほど顕著な関係を示さない。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：エコセメントコンクリート利用技術マニュアル、技報堂出版、pp5-9、2003
- 2) 木村順哉，上野敦，宇治公隆，梶尾聡：エコセメントおよび再生粗骨材の舗装用超硬練りコンクリートへの適用性，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.251-256，2011.2
- 3) 藤野祐樹，上野敦，宇治公隆，大野健太郎，石田征男：エコセメントと再生粗骨材の超硬練りコンクリートへの適用性に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部，Vol.66，pp.1199-1200，2011
- 4) Park Kwangmin，三島直生，畑中重光：エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に及ぼす養生湿度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.69-74，2007.6
- 5) 加賀谷誠，西原康夫，城門義嗣：超硬練りコンクリートの空気連行特性と凍結融解抵抗性に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.3，pp.21-31，2009.9
- 6) 楠貞則，池翰相，添田政司，大和竹史：凍結融解作用による各種混和剤を用いたコンクリートのスケーリング特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.237-242，2007
- 7) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技報堂出版，pp.62-68，1988.2
- 8) 胡桃澤清文，蛭川泰卓，名和豊春：エコセメントペーストの微細構造形成に及ぼす各種混和材料の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.63-68，2007.6
- 9) 遠藤裕丈，田口史雄，名和豊春：スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.348-365，2010.9
- 10) 遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊：塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.227-244，2003.2